

◇ 研究报告 ◇

采用时反和时频差分 OFDM 的水声
语音通信方法*周跃海^{1,2} 江伟华^{1,2} 陈磊^{1,2} 童峰^{1,2†}

(1 厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 厦门 361005)

(2 厦门大学海洋与地球学院 厦门 361005)

摘要 针对水声信道多径、时变、多普勒等恶劣传输特点对水声语音通信的严重影响,本文采用多通道时间反转和时频差分 OFDM 进行水声语音通信技术方案设计,该方法首先通过多通道时间反转进行时间域和空间域多径聚焦,进而结合时频差分 OFDM 调制解调抑制残留多径的影响。由于无需采用信道估计和均衡算法,系统实现方便、复杂度低,同时对信道具有一定程度的稳健性。该方法语音压缩编码采用混合激励线性预测编码。仿真实验和海试实验表明了本文方案的有效性。

关键词 水下语音通信,多通道时间反转,时频差分 OFDM

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2015)04-0283-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2015.04.001

Underwater acoustic speech communication using time reversal and
time-frequency differential OFDM methodsZHOU Yuehai^{1,2} JIANG Weihua^{1,2} CHEN Lei^{1,2} TONG Feng^{1,2}

(1 Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technique of the Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

(2 College of Ocean & Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract The difficulties of underwater acoustic channel, i.e., multipath, time varying and Doppler shifting pose significant challenges to underwater acoustic speech communication. In this paper, multi-channel time reversal is incorporated with time-frequency differential orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology to design an underwater acoustic speech communication system, which enables time-frequency domain focusing of multipath by multi-channel time reversal, as well as suppressing of the residual multipath with time-frequency differential OFDM. Thus the employment of complicated channel estimation and equalization are avoided to facilitate the low complexity system implementation. In addition, the mixed-excitation linear predictive (MELP) is employed for speech encoding. The simulation and sea trial demonstrate the effectiveness of the method at presence of time varying multipath underwater acoustic channel.

Key words Underwater acoustic speech communication, Multi-path time reversal, Time-frequency differential OFDM

2014-10-10 收稿; 2014-12-30 定稿

*国家自然科学基金资助项目 (11274259)

作者简介: 周跃海 (1987-), 男, 福建连城人, 博士研究生, 研究方向: 水声信号处理。

† 通讯作者 E-mail: ftong@xmu.edu.cn

1 引言

随着海洋开发、资源勘探、水下作业、国防安全等领域对水下语音传输的需求日益增多,水声语音通信技术研究受到各国的高度重视。由于水声信道具有复杂的时-空-频变特性,传统的单边带或双边带模拟调制技术进行语音通信^[1],难以克服浅海信道中的时变多径和时变多普勒的影响,性能受到严重限制。

由于OFDM系统具有抗多径性能较好、频谱利用率高等特点,采用OFDM系统传输语音成为水下高速通信的研究热点,如Sadeghi S. M. J.^[2]等人设计的OFDM调水声语音通信系统,实验结果表明在信道较理想的情况下该系统可以获得不错的性能;黄李海^[3]等人在OFDM系统上采用LDPC信道编码和语音压缩MELP算法进行水下语音通信;殷敬伟^[4]等人采用差分OFDM结合MELP算法和信道编码进行水下语音通信。

由于OFDM系统对频率偏移和相位噪声比较敏感,水声信道引入的频率偏移和相位噪声会严重破坏OFDM子载波正交性。为了克服这一问题,科研工作者采取了一系列的措施:LeiWan^[5]等人在快速变化的水声信道中采用自适应调制和编码方案,接收端进行OFDM信道估计和解码以后通过计算信噪比来改变调制和编码模式;Alain Y.Kibangou^[6]等人在OFDM系统上设计了新的OFDM数据格式用来估计多普勒频移因子和等效信道;冯成旭^[7]等人则引入多级缓冲机制和判决反馈机制,提出了新型的判决反馈OFDM频域均衡算法并进行水池实验验证。但是,在随机时变水声信道中,上述OFDM信道估计、载波恢复、均衡算法的性能将受到参数设置、算法收敛特性和信噪比等因素的严重影响。

时频差分OFDM技术通过时域、频域的双重差分进行调制解调,从而无需进行信道估计、均衡处理即可克服信道一定程度时、频变化造成的影响,系统复杂度低、适合进行硬件设计实现。但采用时间频率双重差分导致频率、时间利用率下降,影响了传输速率;另外,对于时频差分OFDM系统,考虑到水声信道较为严重的多径时延扩展,在OFDM符号中如采用长度大于多径时延扩展的循环前缀将进一步降低有效传输速率。

时间反转技术由于不需要对信道有先验知识而自适应聚焦多径,已在水声通信中得到广泛的研究和应用^[8],在采用多通道时间反转实现信道多径的时间、空间聚焦后,时频差分OFDM系统只需抑制时反聚焦后残余多径的影响,可进一步提高信道适应性能;同时,多径时反聚焦后,OFDM符号可采用较短的循环前缀以降低时频差分调制对传输速率的影响。

本文采用多通道时间反转联合时频差分OFDM技术进行水声语音通信系统设计,并采用2.4 kbps MELP语音压缩编码进行语音信号的信源编码^[9],采用卷积编码进行信道编码进一步提高了系统的稳定性。仿真实验和海试实验表明了该方案的有效性。

2 原理介绍

2.1 时频差分OFDM

时频差分OFDM方案中,导频间隔为2,导频符号插入与前一个数据符号相反的信号,在一个OFDM符号中,数据符号个数和导频个数都为 M 。设第 i 个OFDM符号上第 m 个子载波上的原始数据符号为 $d_{i,m} = e^{j\varphi_{i,m}}$, $m = 1, 3, \dots, 2N-1$, $\varphi_{i,m} \in \{0, 2\pi\}$;经时域差分调制后的数据为 $s_{i,m} = e^{j\Delta\varphi_{i,m}}$,其中:

$$\Delta\varphi_{i,m} = \varphi_{i,m} + \Delta\varphi_{i-1,m}, \quad (1)$$

进一步进行频域差分,即第 i 个符号第 $m+1$ 个子载波为导频数据: $s_{i,m+1} = e^{j\Delta\varphi_{i,m+1}} = e^{-j\Delta\varphi_{i,m}}$,则有

$$\Delta\varphi_{i,m+1} = -\Delta\varphi_{i,m} = -(\varphi_{i,m} + \Delta\varphi_{i-1,m}). \quad (2)$$

接收端首先进行时域差分解调,提取接收数据信号的相位信息 $\hat{\varphi}_{i,m}$ 与前一符号的相位信息 $\hat{\varphi}_{i-1,m}$ 相减,然后进行频域解差分,利用导频信号对数据信号进行修正恢复原始数据。

在相邻符号间信道保持稳定、多径对相邻子载波引起相位偏移相同的情况下,时频差分OFDM无须进行信道估计、均衡处理,因而系统实现方便,对信道适应性能较好。但在多径扩展及时变均较严重的水声信道条件下,上述前提往往无法满足。

时频差分OFDM系统采用差分正交相移键控(Differential quadrature phase shift keying, DQPSK)调制后第 i 个OFDM符号经 N 点IFFT

实现后为

$$x_{i,n} = \sum_{m=0}^{N-1} e^{j(\varphi_{i,m} + 2\pi nm/N)}, \quad 0 \leq n \leq N, \quad (3)$$

式(3)中 $x_{i,n}$ 表示第 i 帧输出的第 n 个采样值。相应的第 $i+1$ 帧输出的第 n 个采样值为

$$x_{i+1,n} = \sum_{m=0}^{N-1} e^{j[(\varphi_{i,k} + \Delta\varphi) + 2\pi nm/N]}, \quad 0 \leq n \leq N, \quad (4)$$

发射信号在时变水声信道中传输, 受到 L 条散射衰落多径的影响, 接收信号为

$$\begin{aligned} y_{i,n} &= \sum_{l=0}^{L-1} h_{i,n,l} x_{i,n-l} + w_{i,n} \\ &= h_{i,n,0} x_{i,n} + h_{i,n,1} x_{i,n-1} + \cdots \\ &\quad + h_{i,n,L-1} x_{i,n-L+1} + w_{i,n}, \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中 $h_{i,n,l}$ 为第 i 帧第 l 条多径信道的冲激响应, $w_{i,n}$ 为第 i 帧的加性高斯白噪声。

经过 FFT 变换后为^[10]

$$\begin{aligned} Y_{i,m} &= \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} H_{i,l}^{m-k} e^{j(\varphi_{i,k} - 2\pi lk/N)} + W_{i,n} \\ &= \sum_{l=0}^{L-1} H_{i,l}^0 e^{j(\varphi_{i,m} - 2\pi lk/N)} \\ &\quad + \sum_{k \neq m} \sum_{l=0}^{L-1} H_{i,l}^{m-k} e^{j(\varphi_{i,k} - 2\pi lk/N)} + W_{i,n} \\ &= \alpha_{i,m} X_{i,m} + \beta_{i,m} + W_{i,m}, \quad 0 \leq m \leq N-1, \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中 $W_{i,m}$ 为 $w_{i,m}$ 的频率响应, $H_{i,l}^{(m-k)}$ 为时变多径信道 $h_{i,n,l}$ 的频率响应, 且

$$H_{i,l}^{m-k} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} h_{i,n,l} e^{-j2\pi(m-k)n/N}, \quad (7)$$

式(6)中的 $\alpha_{i,m}$ 表示接收信号的乘性畸变, $\beta_{i,m}$ 表示子载波间干扰(Inter-carrier interference, ICI)。

2.2 采用多通道时间反转处理的时频差分 OFDM

时反技术具有空时聚焦的特性, 在时频 OFDM 系统中首先采用多通道垂直阵时反处理进行多径聚焦, 可有效抑制多径。对于 M 通道垂直阵时间反转系统, 假设第 j 个信道的冲激响应为 $h_j(t)$, 第 j 个信道接收到的信息信号

$$s_{jr}(t) = s(t) \otimes h_j(t) + n_j(t). \quad (8)$$

经过时反处理器后信号为

$$\begin{aligned} r_j(t) &= s_{jr}(t) \otimes h_j(-t) \\ &= [s(t) \otimes h_j(t) + n_j(t)] \otimes h_j(-t) \\ &= s(t) \otimes h_j(t) \otimes h_j(-t) + n_j(t) \otimes h_j(-t) \\ &= s(t) + n_j(t) \otimes h_j(-t). \end{aligned} \quad (9)$$

将各个通道时间反转处理后的信号叠加构成多通道时间反转, 叠加后的信号为

$$\begin{aligned} s'(t) &= \sum_{j=1}^n r_j(t) \\ &\approx s(t) \otimes \left[\sum_{j=1}^M h_j(t) \otimes h_j(-t) \right], \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中方括号内为垂直阵列各信道响应自相关函数之和, 记为 q 函数^[11]。在理想情况下, 水声信道的 q 函数可近似为冲激函数, 从而实现多径的时空压缩。时反处理后式(5)中 L 条散射衰落多径被大大压缩为 L' 条 ($L' \ll L$), 因此时反处理后 OFDM 符号可采用较短的循环前缀长度, 从而减轻时频差分 OFDM 系统中时间、频率利用率低造成的传输速率下降。

此时, 式(6)中 $\alpha_{i,m}$ 代表的乘性畸变以及 $\beta_{i,m}$ 项所代表的 ICI 均被有效抑制。时频差分 OFDM 系统解调时只需对残余多径造成的乘性畸变及 ICI 进行抑制即可恢复数据。因此, 结合多通道时反处理和时频差分 OFDM 可提高系统对信道多径的容忍程度。

3 系统方案

本文将时反技术与时频差分 OFDM 结合起来, 并采用 2.4 kbps 混合激励线性预测(Mixed-excitation linear predictive, MELP) 低比特率数字语音编码及卷积编码分别进行信源及信道编码, 构建水声语音通信系统, 时反差分 OFDM 水声语音通信系统框图如图 1 所示。

图 1 中, 在调制端, 原始输入语音通过 MELP 语音编码器, 输出的二进制比特流传输速率为 2.4 kbps。输出的二进制流进行卷积编码和交织编码后, 通过串并转换转换为若干个并行的低比特数据流, 利用 DQPSK 进行时频差分编码, 完成二进制比特信息到频域信号的映射, 最后进行 IFFT 运算实现频域信号到时域信号的转换。为了抵抗信道多

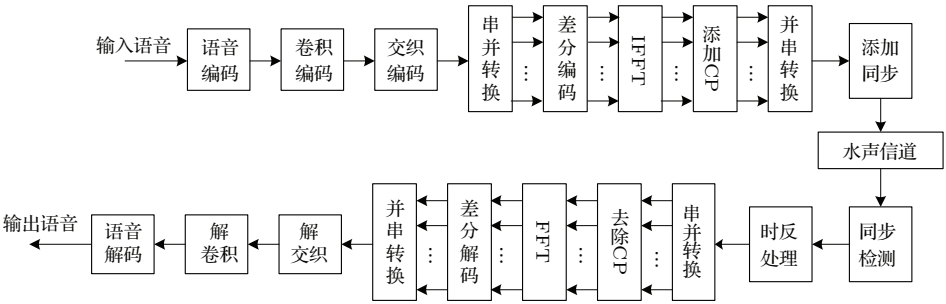


图1 时反差分 OFDM 水声语音通信系统框图

Fig. 1 Block diagram of time-reversal and differential OFDM underwater speech communication

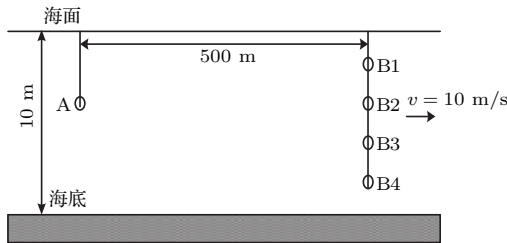
径造成的码间干扰及子载波间的干扰,对调制后的各帧信号添加循环前缀,由于接收端先进行时反处理聚焦多径,系统可采用较短的循环前缀长度。

在经过并串转换后的串行数据流上添加线性调频(Linear frequency modulation, LFM)信号作为同步信号,以便于接收端的同步头检测,同时 LFM 信号还可以作为时反处理的探针信号。在解调端,同步检测到信号以后,用接收到的探针和本地探针与接收到的信号做时间反转处理,解调时间反转后的信号与调制的过程相反。

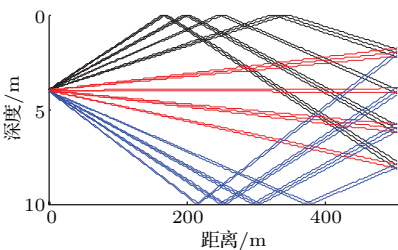
4 仿真与实验

4.1 仿真设计

为了验证时频差分 OFDM 水声语音通信在时变多径信道下的性能,利用 BELLHOP 模型模拟时变信道进行 Matlab 仿真实验。仿真中假设海域为开放性海域,海底地形平坦反射系数为 1,海面平静反射系数为 -1。水域深度 10 m,水域中介质均匀,声速恒定为 1500 m/s。仿真中发射端采用单个换能器,位于水深 4 m 处;接收端采用小尺度的 4 阵元垂直接收阵,各阵元分别位于 2 m、4 m、6 m、8 m 深度处。



(a) 仿真实验示意图



(b) 仿真信道本征声线

图2 仿真实验设计示意图和本征声线

Fig. 2 The schematic diagram of simulation and the eigenray

为模拟信道时变,仿真实验中发射阵元位置保持不变,接收阵元由距发射阵元 500 m 处以 10 m/s 的速度远离发射阵元匀速移动(如图 2(a) 所示)。图 2(b) 为仿真实验的本征声线。记发射节点到接收阵列的信道从海面到海底依次为通道 1、通道 2、通道 3、通道 4。

图 3 为仿真实验的信道响应,由于接收阵列以 10 m/s 的速度远离发射端运动,因此各通道信道响应表现出了明显的时变现象和多径扩展结构。

4.2 仿真实验结果与分析

为了验证时频差分 OFDM 水声语音通信在时变信道下的性能,系统调制解调采用表 1 参数设置。仿真实验比较了单通道与多通道、时反与未做时反处理、时域差分频域差分与时频差分对系统性能的影响。

表 1 仿真实验参数设置
Table 1 The parameters of simulation

项目	参数
采样率	96 kHz
换能器带宽	13 kHz~18 kHz
FFT 点数	4096
子载波数	200
循环前缀长度	10.67 ms
信道编码	无

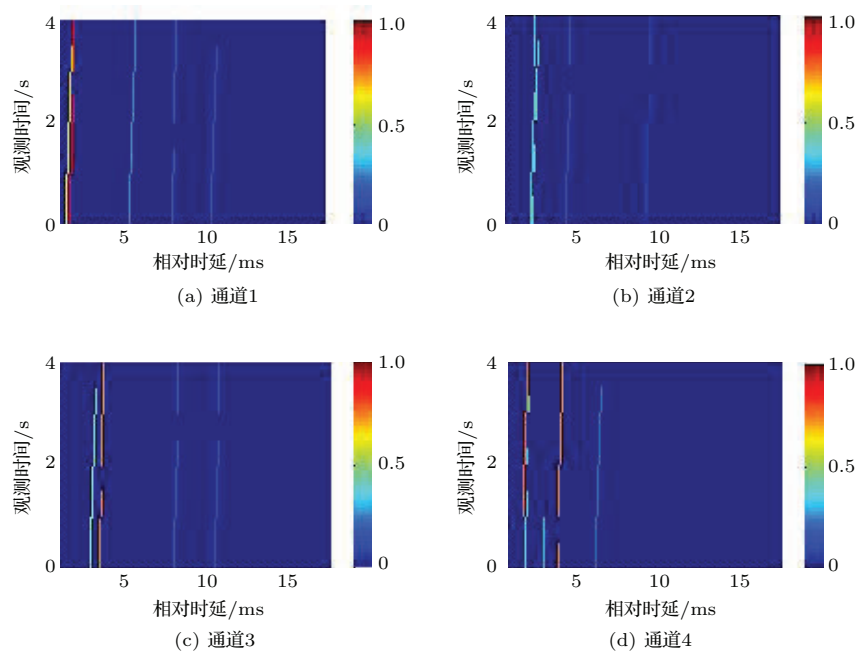


图3 仿真信道冲激响应

Fig. 3 The channel impulse response of simulation

图4给出了三种不同差分方式在不同信噪比下的信噪比-误码率曲线, 采用DQPSK调制解调方式, 不同的信噪比信号由理想信号和高斯白噪声信号叠加而成。对比图中通道1频域差分OFDM、时域差分OFDM和时频差分OFDM对应的曲线, 从图中可以看出, 时变信道条件下, 时频差分OFDM检测表现了最优的性能, 时域差分OFDM检测次之, 频域差分OFDM检测性能最差, 可见时频差分OFDM具有更强的抗多径、抗噪声能力。

图4同时给出了单通道未时反的时频差分

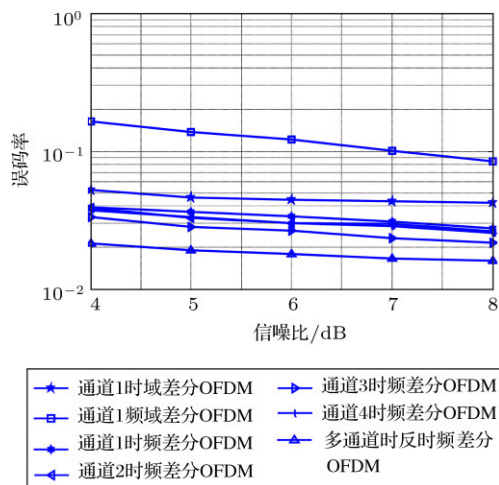


图4 仿真信道下的误码率曲线

Fig. 4 The SNR-to-BER curve of simulation

OFDM与多通道时反的时频差分OFDM信噪比误码率曲线, 从图中可以看出, 在4 dB~8 dB多通道时反的时频差分OFDM系统对应的误码率比单通道未时反的时频差分OFDM对应的误码率低, 实验结果说明, 由于受信道时变、多径及噪声的影响, 时反前各通道接收信号解调原始误码严重, 采用时反处理后接收信号的干扰得到有效抑制, 接收信号的信噪比得到提高, 误码率下降。仿真结果表明, 采用多通道时反的时频差分OFDM可以有效抑制干扰, 降低误码率, 提高OFDM系统的鲁棒性。

4.3 海试实验设置

为了验证时反时频差分OFDM水声语音通信在时变信道下的性能, 于2014年1月15日在厦门市五缘湾海域进行了实验。图5(a)给出了系统收发布放示意图, 图5(a)中A为发射换能器, B1~B4为4阵元垂直接收阵, 换能器之间距离1.5 m。发射换能器A布放深度为5 m, 接收阵列中B1布放深度为1.5 m, 收发换能器之间距离820 m。设接收阵列各阵元接收信号通道从上到下分别为通道1、通道2、通道3、通道4。海试实验的参数如表1所示, 与仿真实验不同的是为了进一步降低误码率, 海试实验中采用卷积码作为信道编码, 卷积码的表达式为(2,1,7)。本文海上试验系统的帧同步信号采用长度

为 25 ms、频率范围 13~18 kHz 的线性调频信号。由于采用时频差分调制和信道编码, 试验系统的等效数据传输速率 1.6 kbps, 低于所采用的语音 MELP 编码速率 2.4 kbps, 因此无法支持实时语音通信。但考虑到水声信道自身具有的传输时延较长, 以及实际语音通信应用的有效语音之间存在明显的静音段, 本文系统可支持一般应用中准实时水下语音通信。

图 5(b) 给出了实验海区的声速梯度曲线。实验时天气晴朗, 风力较大, 海面受阳光和风力的作用形成了表面混合层; 在 4 m~6 m 深度, 声速呈现微弱负梯度; 在深度大于 6 m 后呈微弱正梯度。

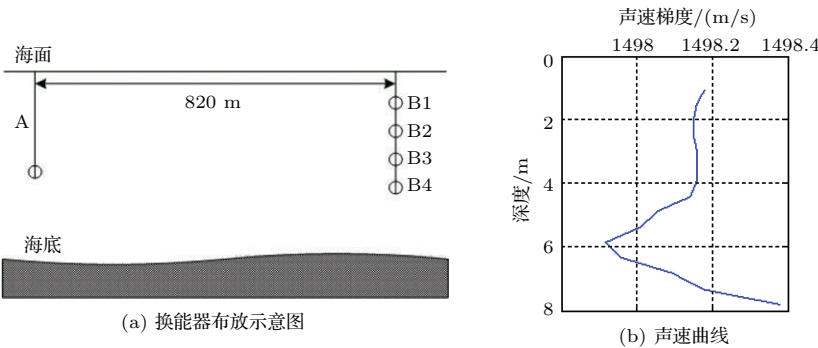


图 5 换能器布放示意图和声速曲线

Fig. 5 Deployment of the transducers and sound speed gradient

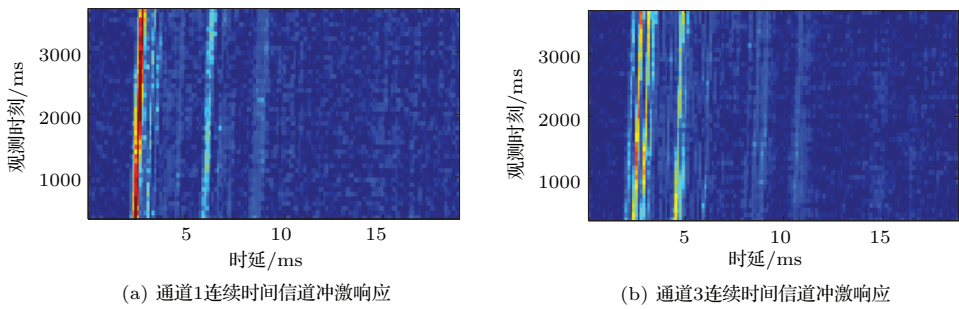


图 6 实验海域连续时间信道响应

Fig. 6 Continuous time channel response

表 2 解调误码率
Table 2 The bit error ratio

参数	原始误码率		纠错后误码率	
	时域差分 OFDM	时频差分 OFDM	时域差分 OFDM	时频差分 OFDM
时反前	通道 1	31.23%	21.71%	48.45%
	通道 2	22.32%	11.32%	43.93%
	通道 3	24.27%	13.48%	42.03%
	通道 4	19.34%	6.59%	39.20%
多通道时间反转	19.56%	6.55%	36.26%	3.70%

4.4 海试实验结果

图 6 给出了通道 1、通道 3 的连续时间信道冲激响应。从图 6 中可以看出, 信道冲激响应存在明显多径扩展和时变特性, 不同通道的多径结构明显不同。利用单频信号测得的信道引入的多普勒频移约为 -2.0 Hz 。

对各通道接收信号按原始信噪比 (10.28 dB) 进行解调, 结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 若对接收信号仅进行时域差分检测, 由于信道时变多径及多普勒频移的影响, 解调误码率较高; 而采用时频差分 OFDM 解调各通道误码率明显下降, 信道特性

较好的通道4误码率甚至降低了一个数量级。可见由于时域差分编码在两个相邻的OFDM符号间进行,时域差分OFDM解调只能应对相邻OFDM符号间的畸变,无法处理OFDM符号内的畸变,即子载波间的干扰。而时频差分OFDM解调的方案由于增加了频域差分参考,因此在处理时变信道造成的码间干扰(Inter-symbol interference, ISI)及ICI方面更有优势。

结合时反处理的结果也证明了这一点。对接收各通道信号进行时间反转处理,然后分别进行时域差分OFDM解调及时频差分OFDM解调,前者解调误码率为36.26%,后者误码率为3.70%。对比时反处理前后差分解调的结果,可以看出结合时反处理后,时频差分OFDM解调的性能比时域差分OFDM解调有更明显的改善,这是因为时反处理使

数据信号和导频信号的多径得到了聚焦,时频差分调制解调只需抑制残余多径的影响。

海试中接收端不同解调处理方案得到的语音效果也反映性能比较结果。时域差分OFDM解调对应的系统误码率较高,语音无法解码恢复;时频差分OFDM解调时反处理前后语音恢复情况如图7~9所示,图7为理想语音,比较图7和图8,从图中可以看出,通道3合成语音有明显的语音缺失,同时引入了能量较高的干扰信号,语音输出不清晰;比较图7和图9采用多通道时反后解调合成语音波形与原始语音解码合成语音相差不大,语音输出的清晰度与自然度亦无明显损失。可见,多通道被动时间反转技术与时频差分OFDM通信结合,可以有效抵抗信道一定程度的时变、多径对水声语音通信性能的影响。

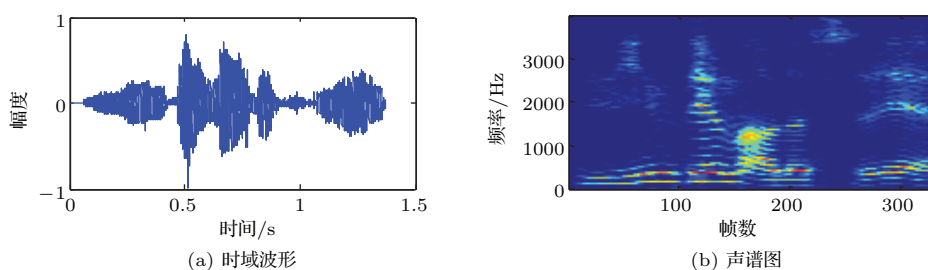


图7 原始语音

Fig. 7 The original speech

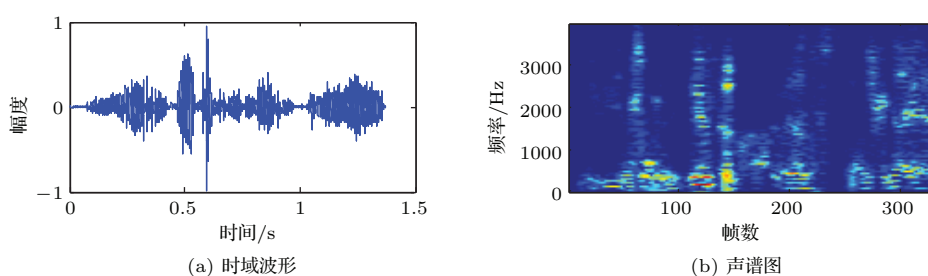


图8 通道3时频差分OFDM解调后合成语音

Fig. 8 The synthetic speech of channel 3

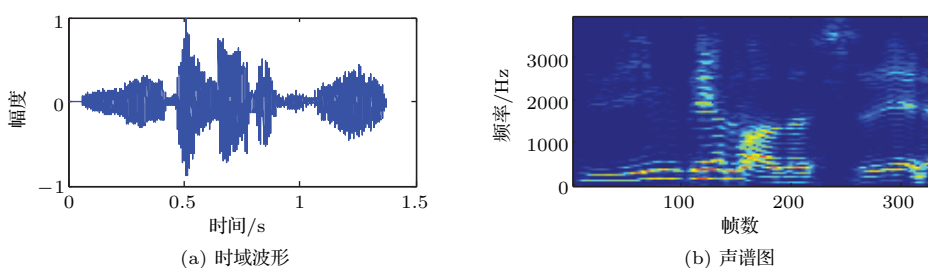


图9 时反结合时频差分OFDM解调后合成语音

Fig. 9 The synthetic speech after time-reversal receiver

值得注意的是, OFDM 属于长码, 在快速变化的水声信道中, 符号间的时间相关性难以保证, 影响通信系统的性能, 本文的仿真实验和海试实验的误码率都说明了这一点, 如本文海试实验中, 在 -2 Hz 的频偏和 10.28 dB 信噪比下, 经过多通道时间反转处理后误码率为 3.7%, 如果采用多普勒补偿, 误码率将会下降, 通信性能将会提升。

5 结论

本文采用多通道时间反转与时频差分 OFDM 相结合, 利用时间反转的自适应聚焦特性聚焦多径, 结合时频差分 OFDM 调制解调进一步聚焦多径和克服多普勒频移。仿真实验表明本文方案可提高水声语音通信系统的信道鲁棒性。海试结果表明, 采用多通道时间反转的时频差分 OFDM 水声语音通信系统接收语音音质清晰、波形恢复质量较好, 语谱信息完整, 接近原始语音。仿真和海上试验表明, 无需采用信道估计和均衡处理, 本文技术方案具有对水声信道一定程度时变多径的容忍能力, 可用于进行水声语音通信系统的低复杂度实现。本文采用卷积码作为信道编码, 其性能不如 LDPC 和 turbo 码, 在后续工作中将采用 LDPC 和 turbo 码作为信道编码提升通信系统的性能; 同时, 本文接收阵列采用 4 个通道略显不够, 未能完全发挥空间增益, 在后续的工作中将采用更多的阵元进行验证。

参 考 文 献

- [1] GEEN M D, RICE J A. Channel-tolerant FH-MFSK acoustic signaling for underwater communications and networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 28-39.
- [2] SADEGHI S M J, DERAKHTIAN M, MASNADI-SHIRAZI M A. Design and implementation of an OFDM-based voice transmission system for mobile underwater vehicles[C]. Computers and Communications (ISCC), 2012 IEEE Symposium on, 2012: 49-52.
- [3] 黄李海, 胡晓毅, 解永军, 等. 基于 MELP 的水下实时语音通信机的研究与实现 [J]. 电子技术应用, 2013, 39(3): 17-19.
HUANG Lihai, HU Xiaoyi, XIE Yongjun, et al. Research and implementation of underwater acoustic real-time voice communication prototype based on MELP[J]. Application of Electronic Technology, 2013, 39(3): 17-19.
- [4] 殷敬伟, 王驰, 白夜, 等. 基于差分正交频分复用的水下语音通信应用研究 [J]. 兵工学报, 2013, 34(5): 591-597.
YIN Jingwei, WANG Chi, BAI Ye, et al. Application of differential orthogonal frequency division multiplexing in underwater speech communication[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(5): 591-597.
- [5] WAN Lei, ZHOU Hao, XU Xiaoka, et al. Adaptive modulation and coding for underwater acoustic OFDM[J]. IEEE Journal of Oceanic engineering, 2014, PP(99): 1-10.
- [6] KIBANGOU A Y, ROS L, SICLET C. Doppler estimation and data detection for underwater acoustic ZF-OFDM receiver[C]. Wireless Communication Systems(ISWCS), 2010 7th International Symposium on, 2010: 591-595.
- [7] 冯成旭, 许江湖, 罗亚松. 消除冗余循环前缀的水声信道 OFDM 频域均衡算法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(4): 482-487.
FENG Chengxu, XU Jianghu, LUO Yasong. Frequency-domain equalization algorithm to eliminate redundant circular prefix for OFDM underwater acoustic communications[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(4): 482-487.
- [8] 周跃海, 李芳兰, 陈楷, 等. 低信噪比条件下时间反转扩频水声通信研究 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(7): 1685-1689.
ZHOU Yuehai, LI Fanglan, CHEN Kai, et al. Research on time reversal spread spectrum underwater acoustic communication under low SNR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(7): 1685-1689.
- [9] 郭中源, 陈岩, 贾宁, 等. 水下数字语音通信系统的设计和实现 [J]. 声学学报, 2008, 33(5): 409-418.
GUO Zhongyuan, CHEG Yan, JIA Ning, et al. Study and implementation of underwater digital voice communication system[J]. Acta Acustica, 2008, 33(5): 409-418.
- [10] 文明. 时变信道 OFDM 水声通信信道均衡技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [11] SONG Aijun, BADIEY M. Time reversal multiple-input/multiple-output acoustic communication enhanced by parallel interference cancellation[J]. Journal of Acoustical Society of America, 2012, 131(1): 281-291.